

레이더 자료에 나타난 전선성 강수계의 중규모적 특성 분석 Mesoscale Characteristics of Frontal System on Radar Data

정 영 선* / 임 은 하* / 남 제 철**

Jung, Young-Sun / Lim, Eunha / Nam, Jae-Cheol

Abstract

In Korea, heavy rainfall is mainly induced by the Changma front or frontal system passed over Korea periodically. Both its unknown mesoscale characteristics and the lack of direct measurements make it difficult to predict precipitation reasonably. To understand its 3-dimensional structure, initiation and development mechanism of precipitation in that system will be very helpful to forecast it more accurately. A meteorological radar is specially useful because it produces direct measurement with high resolution in time and space. In this study, representative frontal system is selected and analyzed specially focused on its vertical structure using radar data. Results shows that there are convective cells with horizontal scale of 10 - 20 km in precipitation system. Melting layer located between 3 and 5 km height, maximum fall speeds of rain drops were seen just below bright band.

Keywords: front, precipitation, 3-dimensional structure, radar

요 지

전선에 의한 강수는 종종 한반도에서 국지적인 집중호우를 유발한다. 그러나 관측자료의 결핍과 전선의 중규모적 구조에 대한 이해 부족으로 정확한 강수량 예측이 어려운 실정이다. 레이더의 공간 해상도는 수 km, 시간 해상도는 수 분으로 중규모 이하의 현상에 대한 관측자료를 제공할 수 있기 때문에 레이더의 효용성은 널리 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 한반도에서 대표적인 전선성 강수 사례를 선택하여 중규모적 특성을 레이더 연직 단면 관측자료에 근거하여 분석하였다. 강수계 내에는 수평규모 약 10 - 20 km의 대류 세포들이 존재하며, 연직 단면도 상에서 나타나는 밝은 띠에 의하면 녹는고도(0°C 층)는 약 3 - 5 km 사이에 위치하고 있다. 강수 입자에 의하여 추정되는 구름의 높이는 대략 12 km에 달한다. 발달한 층운 지역에서 강수입자의 최대 낙하속도는 밝은 띠가 나타나는 녹는고도 바로 하층에서 나타나고 있다.

핵심용어 : 전선, 강수, 3차원 구조, 레이더

* 기상연구소 수문기상연구실, 연구사

Researcher, Hydrometeorological Research Lab., METRI, KMA, Seoul 156-720, Korea

E-mail : jysun@metri.re.kr , @metri.re.kr

** 기상연구소 수문기상연구실, 연구관

Senior Researcher, Hydrometeorological Research Lab., METRI, KMA, Seoul 156-720, Korea

1. 서론

한반도는 중위도 편서풍대에 위치하여 주기적으로 통과하는 이동성 저기압의 영향을 받으며, 이에 동반된 전선에 의한 강수는 종종 한반도에서 집중호우를 유발하는 원인이 되나, 이들이 가진 중규모적 특성으로 인하여 기존의 중관 관측망으로 탐지하기 어렵다. 또한 구름의 일부는 짧은 시간에 급격히 발달하므로 정확하고 신속한 예보가 용이하지 않다. 따라서 이들의 중규모 특성을 이해하고 강수량을 정확히 산정하는 것은 국지적으로 발생하는 집중호우 등의 악기상 예보 정확도 향상에 기여할 수 있으며, 제한된 수자원의 효율적인 관리 및 재분배라는 실용적인 측면에서도 꼭 필요하다.

중규모 이하 미세규모까지 구름 및 강수계의 내부구조 규명에 있어서 레이더의 효용성은 널리 알려져 있다. 따라서 최근 도플러 레이더 관측자료 및 수치모델을 이용한 많은 연구가 수행되고 있다. 국내에서도 최근에는 도플러와 이중 편광(dual polarization) 관측 기능을 가진 이동식 기상 레이더의 도입으로 구름 내의 입자의 형태를 확인함과 동시에 개개 구름 내의 기류 패턴을 연구할 수 있는 환경이 조성되었다. 강수의 발달과 쇠퇴는 강수 구역 내 바람의 연직 구조와 수렴·발산에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있으므로, 단일 도플러 영상을 활용하면 강수역 내의 바람장 뿐만 아니라 단시간 내에 강수의 발달·쇠퇴와 같은 유용한 정보를 추정할 수 있다. 특히 시간에 따라 연속 관측을 수행할 경우 우리 나라 상공을 통과하는 기압 시스템의 발달과 이에 따른 구름 내부의 물리구조 변화를 추적할 수 있다.

본 연구에서는 한반도에서 대표적인 전선성 강우 사례를 선택하고, 이 때 관측된 레이더 자료를 활용하여 공간 구조를 분석하고, 특히 그동안 국내에서 생산되지 않았던 연직단면관측자료(Range-Height Indicator, 이후 RHI) 분석을 통하여 구름 내부 구조에 대한 이해를 증진시키고자 한다.

2. 자료 및 분석 방법

1998년 10월 12일 남부지방을 통과하면서 남부와 충청 지방에 비를 내린 이동성 저기압에 수반된 비구름의 특성이 분석되었다. 분석에는 기본적으로 전국 기상대 및 관측소에 관측된 중관 기상관측자료가 사용되었으며, 전선의 이동 및 발달을 잘 보여주는 GMS 위

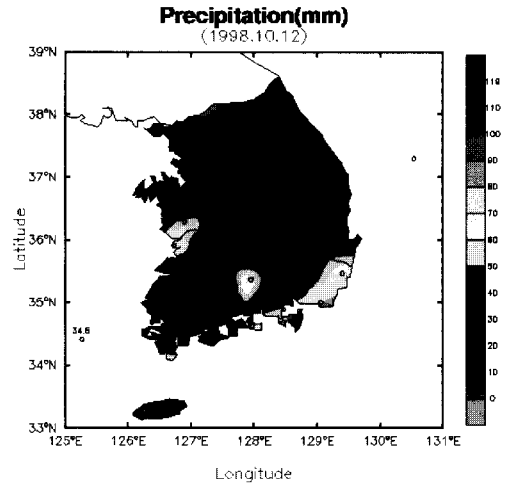


Fig. 1. Accumulated rainfall amount over Korea on 12 October 1998.

성에서 관측된 수증기 영상이 보조 자료로 이용되었다. 강수계의 내부구조 분석에는 연구용 도플러 기상레이더에서 관측된 강수계의 수평다층관측(VOLUME) 및 RHI가 포함되었다. 관측은 120 km 반경의 도플러 관측모드로 수행되었다.

비구름은 기상연구소가 보유하고 있는 3.2 cm 파장의 이동식 X-밴드 도플러 레이더로 청주 국제공항(127.50°E, 36.73°N)에서 관측되었다.

대상 사례기간 중 충청 지방에는 40 mm/일 이상의 비가 내렸으며, 거제에서는 12일 100 mm/일 이상의 강우량이 기록되었다. 이 때 전국 기상대 및 관측소에서 관측된 일 강수량이 Fig. 1에 제시되었다.

3. 기상 개황

3.1 위성자료 분석

분석 영역을 통과한 상층 단파 및 지표 한랭전선과 관련된 강수현상은 한반도에서는 빈번히 발생하는 현상으로, 위성에서 관측된 수증기 영상에서 전선의 이동 및 발달 상황을 개략적으로 알 수 있다. 대기 하층에는 수증기의 양이 많으며, 자연적인 변동량 또한 크기 때문에 대기 하층의 수증기는 자료 해석에 오류를 일으킬 위험이 높다. 따라서 위성에서의 수증기 영상은 수증기의 양이 상대적으로 적은 대기의 중상층 600~300 hPa의 수증기를 탐지하고 있다. 수증기 영상은 대기 중 수증기의 이동 상황을 잘 보여주며, 특히 하

강지역에 대한 정보를 제공하기 때문에 전선 분석에 유용하게 이용될 수 있다. 여기서는 적외 영상은 제시하지 않았으나, 전선 통과 후에도 건조공기 유입(dry intrusion) 지역에서의 하층운에 의하여 강수는 지속되었다. 적외 영상과 수증기 영상의 차이는 주로 대기 하층에 위치한 구름 혹은 한랭전선 후면 기단의 상대적으로 낮은 기온에 의하여 유발된 것으로 보인다.

Fig. 2는 GMS에서 관측된 수증기 영상으로 저기압이 점차 발달하며 서해를 지나 한반도를 통과하여 12일 한반도를 빠져나가는 모습이 잘 나타나 있다.

Simple(1998)은 Young(1993)의 연구를 계승하여 중위도 전선의 발달 단계에 대한 개념모델을 아주 쉽게 제시하고 있다. 그의 개념모델은 저기압의 생성부터 성숙된 저기압으로 발달할 때까지를 크게 7단계로 분류하고, 그 역학구조를 자세히 설명하고 있다.

Simple의 발달 단계 분류에 의하면 11일 1500 LST(Fig. 2a)에 저기압은 일 모양 구름을 형성하고

있다. 이 저기압은 2100 LST(Fig. 2b)에는 전선이 S-형으로 굴곡하면서 머리 부분의 구름이 더욱 발달한다. 12일 0300 LST(Fig. 2c)에 저기압은 콤파형으로 발달하기 시작하며, 한랭전선 후면 및 온난전선 전면에서 건조공기의 하강에 의하여 구름 가장자리가 선명하게 나타난다. 0900 LST(Fig. 2d)에 저기압 머리 부분에서 건조공기의 유입이 더욱 발달하면서 구름대는 콤파형으로 발달하였다. 콤파 구름의 머리 부분은 더욱 발달하고, 1500 LST(Fig. 2e)에 저기압은 완전히 발달하였으며, 건조공기의 유입에 의한 구름 없는 지역(cloud free region)을 확실히 볼 수 있다. 이후 저기압은 머리부분의 구름만을 한반도 중부지방에 남기고 점차 약화되며 이동한다(Fig. 2f).

이때 12일 2100 LST의 일본 기상청의 지상 일기도 분석(Fig. 3)에서는 전선이 아직 서해 상에 머물러 있는 것으로 분석되어있는데 이는 전선 분석의 어려움을 잘 보여준다.

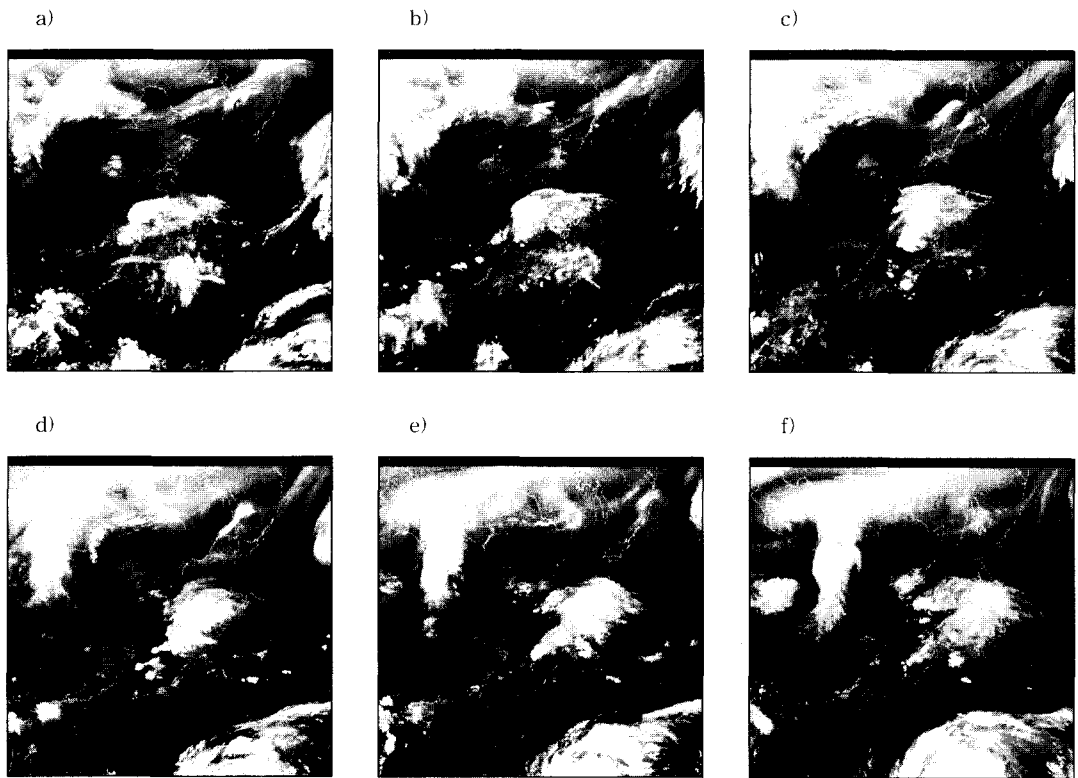


Fig. 2. GMS water vapor satellite imagery at a) 1500 LST(Local Standard Time) b) 2100 LST 11 October, c) 0300 LST, d) 0900 LST, e) 1500 LST, and f) 2100 LST 12 October 1998.

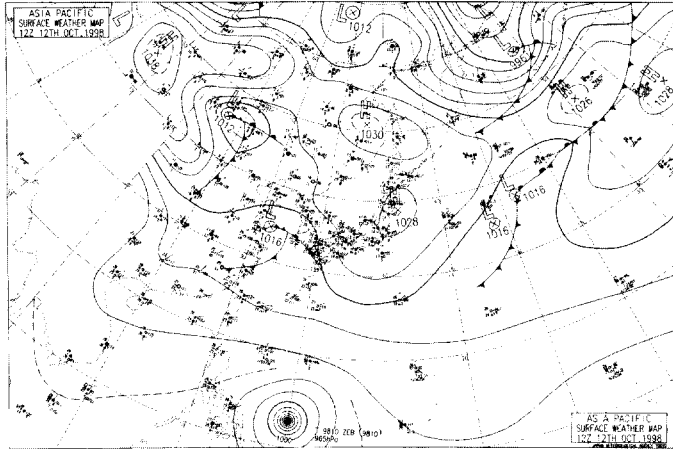


Fig. 3. Surface weather map at 2100 LST 12 October 1998.

3.2 종관 기상 자료 분석

한 지점에서의 강수량의 시계열자료는 그 지역에서의 전선 통과 시간에 대한 정보를 준다. 이 사례기간 중 저기압 중심이 한반도 중남부 지방을 통과하였으며, 한반도는 전체적으로 전선의 머리 부분의 영향을 받았

다. 이중 전선의 머리 부분의 중심에 위치한 청주와 이보다 조금 남쪽에 위치한 부여, 그리고 부여의 남동쪽에 위치하며, 12일 100 mm/일 이상의 강수량을 보인 거제를 선택하여 12일에서 13일까지의 시간별 강수량을 도시하였다(Fig. 4).

청주지방(Fig. 4a)은 강수계의 머리 부분에 위치하

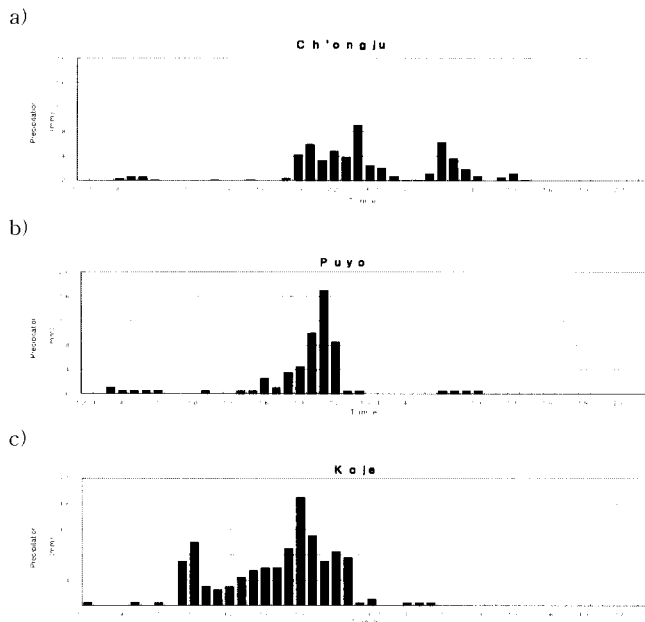


Fig. 4. Time series of hourly precipitation at a) Cho'ngju, b) Puyo, and c) Koje on 12 October 1998.

여 강수계가 빠져나가는데 상대적으로 긴 시간이 소요되었다. 전선 머리 부분은 계속적으로 전선 진행방향의 뒤쪽으로 구름대가 발달하는 지역으로, 위성사진에서도 볼 수 있듯이 전체 시스템이 빠져나간 뒤에도 계속 생성된 구름으로 인하여 충청지방에는 오랫동안 구름대가 머물렀다. 시간 당 강수량도 최대 10 mm 내외로 여러 시간동안 거의 고른 강수량을 보였다.

이에 비하여 부여지방(Fig. 4b)은 전선 통과에 따른 강수량상을 확실히 보여주고 있다. 강수는 수 시간 내에 집중적으로 내렸으며 전체 강수계가 지나간 13일까지 내린 총 강수량 53.5 mm 중 47 mm가 1600 LST부터 2200 LST까지의 6시간 내에 내렸다. 이 강수는 전선 머리가 통과함에 따라 내린 강수로, 20-21시 사이에 시간당 최대 강수량 17.0 mm를 보였으며, 이후 수 시간 내에 강수가 종료하였다.

거제 지방(Fig. 4c)은 강수계 통과 기간('98.10.11 - 12) 중 전국에서 가장 많은 일 강수량(112.3 mm)을 보인 지역으로, 전선 통과 시부터 적외 영상에서 나타나는 한랭전선 후면에 나타나는 대류운(그림으로 제시하지 않음)에 의하여 지속적인 강수를 보였으며, 특히 2100 LST 위성 영상(Fig. 2f)에서 강하게 보이는 대류성 구름에 의하여 2300 LST까지 많은 비가 내렸다.

한반도에서의 강수는 12일 0100 LST에 남서 해안으로부터 시작되었으며, 점차 내륙 지방으로 이동하면서 강수량이 서서히 증가하였다. 위성 영상과 지상 강수량을 종합하면 한반도를 통과하며 기압계가 발달함에 따라 새벽에 온난 기단의 영역에서 남서해안으로부터 비가 내리기 시작하였으며, 0800 LST - 1000 LST에는 지표 한랭전선이 통과하며 한반도 남부지방에 남서-북동 방향으로 강수대가 형성된 것으로 보인다.

이후에 중부 지방과 남부지방에 내린 강수는 서로 다른 물리적 원인에 의한 것으로, 중부지방은 저기압의 중심부근의 구름에 의하여, 그리고 남해안 지역은 한랭전선 후면의 구름에 의하여 비가 내린 것으로 추정된다. 즉, 저기압은 한반도를 통과하며 점차 발달하고 전선의 머리 부분에서 후면으로 계속적으로 발달한 구름이 중부지방에, 한랭전선 후면에서 발달한 구름이 거제를 비롯한 남해안 지역에 비를 내렸다. 따라서 이번 분석에서는 지표에서 한랭전선의 통과에 따른 변화는 분석하기 어려웠다.

4. 레이더 자료 분석

이 기간 중 레이더에 의한 VOLUME 관측과 RHI 관측이 일부 수행되었다. 관측은 레이더 설치지인 청주 공항에 비가 내린 14시경에 시작되었으며, 13일 09시 10분까지 계속되었다. 1730 LST부터 2015 LST까지는 결측되어, 완전한 분석을 행할 수 없었다. 차기 분석에서는 관측자료가 보강되어, 보다 자세한 분석을 할 수 있을 것으로 기대된다.

4.1 반사도의 수평분포

반사도의 수평분포를 보기 위하여 레이더를 중심으로 방위각과 시선방향의 극 좌표에서 취득된 레이더 자료를 3차원 직각좌표 상의 각 격자점 값으로 내삽하여 등고도 평면에서의 반사도(CAPPI)를 표출하였다. 레이더 자료의 좌표변환은 보편적으로 널리 사용되는 Cressman(1959)의 가중함수를 이용하였다. 이 방법에서는 각각의 격자점을 중심으로 영향구 내의 관측 값들이 거리에 대한 Cressman의 가중함수에 따라 각각의 격자점에 영향을 주게된다. Cressman의 weight function을 이용한 내삽법이 식 (1)과 (2)에 제시되었다.

$$G = \frac{\sum D_i W_i}{\sum W_i} \quad (1)$$

$$W(D_i) = \frac{R^2 - D_i^2}{R^2 + D_i^2} (D_i \leq R) \\ = 0 (D_i > R) \quad (2)$$

여기서 G 는 직각좌표 격자점에서 내삽되는 값, D_i : 극좌표상에서 i 점의 값, W : Cressman weight, R : 영향구의 반경(보통은 격자간격)이다.

이 Cressman의 가중함수는 격자점에 가까운 점에 높은 가중을 주고, 멀리 있는 점에 낮은 가중을 주어 격자점에 미치는 영향에 차이를 두는 방법으로, 영향구 경계에서는 가중이 0이 되어 격자점에 영향을 미치지 않는다(최순희, 1996). 그러나 본 분석에서는 이를 변형하여 격자점에 가까운 점에 보다 높은 가중을 주고, 격자점에서 멀어질수록 가중이 낮아져, 영향구의 경계에서의 값이 음수가 되도록 하였다. 이 결과로 해당 격자점의 특성이 최대한 보존되었으며, 영향구 경계에서의 값도 격자점 값에 반영되었다.

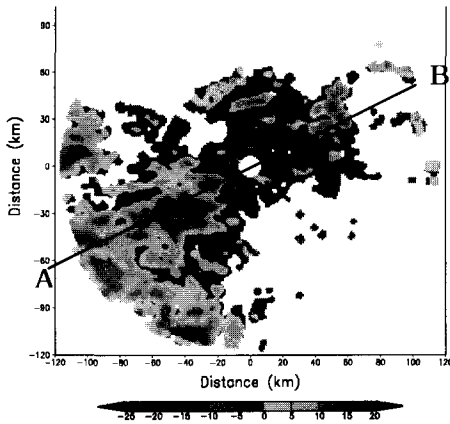


Fig. 5. Radar reflectivity at 1 km at 1555 LST, 12 October 1998.

Fig. 5는 1998년 10월 12일 1555 LST에 레이더로 관측된 강수예코의 1 km 등고도 평면에서의 반사도이다. 이 높이는 지표 근처에서의 레이더 자료의 오염을 피하면서 실제 강수와 가장 유사한 강수 패턴을 보기 위하여 선택되었다. Fig. 5에서 레이더 설치지를 중심으로 서남서에서 동북동 방향으로 주변보다 강한 에코대가 나타나고 있다. 따라서 Fig. 5에 보이는 AB 선($245^\circ - 65^\circ$)을 따라 RHI 관측을 수행하였다. 이 시간에는 충청지방에서 지표에서의 강수가 시작되는 단계로, Fig. 5에 보이는 에코는 CAPPI 자료가 분석 가능한 2114 LST 이후에는 전 영역에서 더 강해졌으며 레이더 설치지를 중심으로 보다 북동쪽으로 이동하였다.

4.2 반사도의 연직 분포

Fig. 6은 사례 기간동안 관측된 RHI 자료의 예로 충청 지방에 강수가 있었던 약 4시간동안의 자료 중 7장의 그림을 선택하여 제시하였다. 관측이 불규칙한 시간 간격으로 수행되었고, 중간에 약 3시간의 결측이 있어 시스템의 발달을 추정하기는 어려우나, 관측된 자료만으로도 강수계의 내부 구조에 대하여 많은 정보를 얻을 수 있었다. 단면도 상에서 A 지역은 구름 머리 내부의 대류에 의한 구름이 계속적으로 발달하는 지역이며, B 지역은 구름 머리의 북서쪽 가장자리에 위치하고 있다. 이 시간대에 관측 단면에서 강수계는 약 48 km/h의 속도로 동진 하고 있다.

연직 단면도 상에 나타난 대략적인 특징을 보면, 강

수계 내에는 수평규모 약 10 - 20 km의 대류 세포들이 시스템 내부에 존재하고 있다. 레이더 영상에서 대류세포는 반사도의 차이에 의하여 쉽게 인식할 수 있다. 레이더 반사도의 특성에서 이미 전체적인 시스템은 대류 단계를 지나 층운 단계에 있음을 알 수 있다. 낮은 고도(0°C 층)에서 발달하고있는 밝은 띠(Bright Band, 이후 BB)는 구름이 층운으로 발달하고 있음을 알려주는 강한 지시자(index)로 약 3 - 5 km 사이의 높이에 낮은 고도가 존재하고 있다. 수평적으로 균일하고 강수가 상대적으로 정상상태에 이르는 층운에서 낮은 고도에서 설편의 부착에 의한 입자의 크기 증가와 얼음과 눈이 녹아 반사도가 증가하는 것이 그 주된 이유이다(Goke and Waldvogel, 1997).

강수 입자에 의하여 구름의 높이를 추정할 수 있는데, 레이더 후방으로 대류가 발달한 지역에서는 12 km에 이르며, 에코의 선단과 후방에서는 8 - 9 km 정도이다. 구름 머리 지역은 한랭전선 전면의 온난한 공기와 온난전선 전면의 한랭한 공기가 상승하는 지역으로 온난한 공기에 의하여 구름 꼭대기를 형성하는 것이 일반적이다. 대류세포는 한 개가 단독적으로 발달하기도 하고, 여러 개의 대류세포가 합쳐져서 발달하기도 한다. 이 대류세포 사이에 상승공기를 상쇄하는 하강기류가 존재하게 되는데, 대류세포 사이에 성층권으로부터 내려온 건조공기에 의하여 파란 건조영역이 나타나고 있다.

1700 LST(Fig. 6a)에 레이더 서쪽으로 여러 개의 대류 세포가 보이는데, 이들 대류세포는 Atlas(1997)의 분류에 따르면 초기 층운기를 지나 2차 층운기로 발달하고 있다. 그는 강수계의 발달을 대류기, 전이기, 초기 층운기, 2차 층운기로 나누어, 대류기를 지나 강수량이 증가하는 시기를 초기 층운기로 보았으며, 강수량의 최대 강수량을 지나 강수가 약해지는 시기를 2차 층운기로 분류하였다. 초기 층운기와 2차 층운기는 레이더 반사도에서 특징적인 차이를 보이는데, 2044 LST(Fig. 6e)에서 보이는 현저한 가로방향의 BB가 2차 층운기의 특징이다. 각 발달단계의 전이에 소요되는 시간은 중간 결측에 의하여 추정하기 어려웠다. 1732 LST(Fig. 6d)까지 초기 층운기에 있던 강수계는 관측이 다시 재개된 2044 LST(Fig. 6e)에는 2차 층운기로 전개되었으며, 낮은 고도 위쪽으로는 약 10 km의 수평 규모를 갖는 상층으로부터의 건조공기의 유입이 약 10 km 간격으로 나타나고 있다. 시간이 지나면서 층운 지역에서는 상층에서의 하강기류에 의한

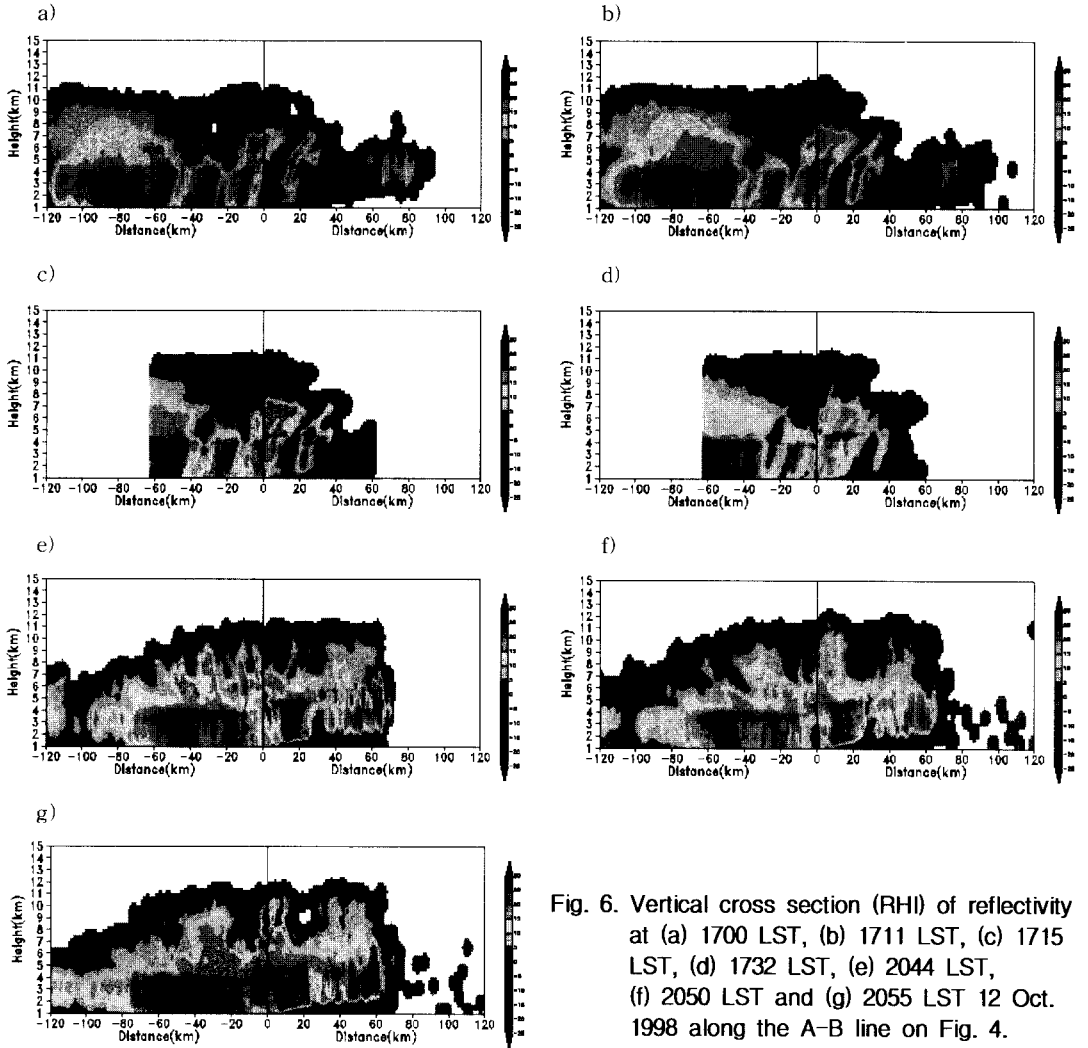


Fig. 6. Vertical cross section (RHI) of reflectivity at (a) 1700 LST, (b) 1711 LST, (c) 1715 LST, (d) 1732 LST, (e) 2044 LST, (f) 2050 LST and (g) 2055 LST 12 Oct. 1998 along the A-B line on Fig. 4.

여 건조 영역이 증가한다. 이때 위성 영상에서 보면 충청지방에서는 구름머리의 중심이 빠져나가고 있다.

Fig. 7은 Fig. 6의 각 시간대 중 서로 다른 발달 조건에 있는 세 시간대에 레이더 설치 지점에서 연직으로 관측된 반사도와 입자들의 도플러 속도를 보여준다. 여기에서 바람의 수평성분은 고려되지 않았으며, 도플러 속도는 강수 입자의 레이더 시선방향의 속도 성분만을 나타내는 것으로, 구름 내부의 바람장과는 구별되어야 한다.

Fig. 7a는 대류세포 내부에 위치하나 아직 밝은 띠가 제대로 발달하지 않은 상태이다. 이때는 2 - 7 km 사이의 깊이에서 반사도가 거의 일정하게 나타나며, 반

사도가 급격히 낮아지는 8 km 고도에서는 약한 입자의 상승운동이 나타나며, 이외의 고도에서는 전층에서 입자는 하강하고 있다. 하강속도는 4 km 고도에서 약 8 m/s로 최대값을 보이나 전반적으로 하층으로 내려가며 증가하고 있다.

Fig. 7b는 대류세포 사이의 하강역이다. 전 층에서 약한 반사도를 보이며, 입자의 하강속도도 4 m/s 이하로 약하게 나타난다.

Fig. 7c는 밝은 띠가 현저하게 발달한 지역이다. 이 지역에서는 입자의 최대 낙하속도는 밝은 띠가 나타나는 고도 바로 하층에서 나타나며, 그 최대 값은 16 m/s에 이른다.

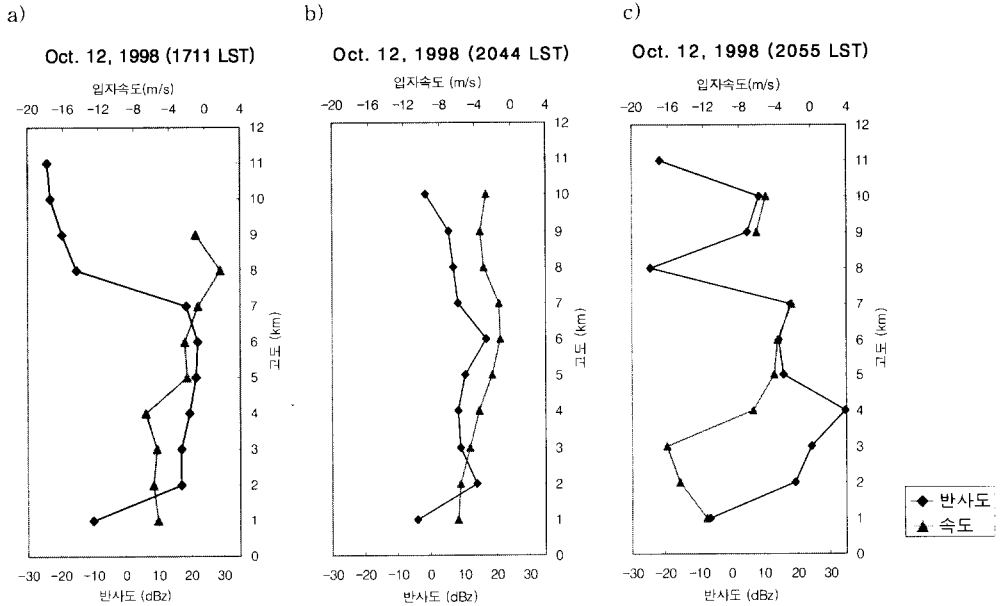


Fig. 7. Vertical profiles of Radar reflectivity and Doppler velocity at (a) 1711 LST, (b) 2044 LST and (c) 2055 LST on 12 Oct. 1998

높은 고도에서는 설편의 부착으로 큰 입자가 생성되며, 이 입자가 높아 하강하면서 병합과정에 의하여 더 큰 입자를 형성하게 되고, 따라서 낙하 속도가 증가하게 된다. 이는 높은 고도 바로 아래에서 레이더 반사도를 감소시키는 원인이 된다. 그러나 너무 커진 입자는 낙하하면서 다시 작은 입자들로 쪼개지게 되며, 입자의 낙하속도는 다소 증가하게 된다. 그러나 본 레이더는 입자의 낙하속도를 과대 관측하는 경향이 있다. 이는 앞으로 연구를 통하여 정량적으로 개선하여야 할 것으로 생각된다.

5. 결 론

한반도 전선성 강수계의 3차원 구조 분석을 위한 첫 단계로 전선성 강수계의 연직 구조의 특성이 분석되었다. 이를 위하여 한랭 전선을 동반한 전형적인 가을철 이동성 저기압인 1998년 10월 12일 사례를 선정하여 분석하였다. 분석에는 전국 기상대 및 관측소에서 관측된 종관 기상관측자료와 GMS 위성에서 관측된 수증기 영상 및 연구용 도플러 레이더에서 관측된 수평다층관측(VOLUME) 및 연직단면관측(RHI) 자료가 이용되었다.

이 사례 기간 중 저기압 중심이 한반도 중남부 지방

을 통과하였으며, 한반도는 전체적으로 전선의 머리부분의 지배를 받았다. 11일 1500 LST에 앞 모양의 구름을 형성하고 있던 저기압은 12일 0900 LST에는 콤팩트형으로 발달하였으며, 한반도에 내린 강수는 대부분 저기압 중심 부근의 대류운 또는 한랭전선 후면의 대류구름에서 내린 것으로 보인다. 저기압은 한반도를 통과하면서 점차 발달하며, 전선의 머리 부분에서 후면으로 계속 발달한 구름이 중부지방에, 한랭전선 후면에서 발달한 구름이 남해안 지방에 비를 내렸다.

레이더 연직 단면도 상에 나타난 특징을 보면, 강수계 내에는 수평규모 약 10 - 20 km의 대류 세포들이 시스템 내부에 존재하고 있다. 레이더 반사도의 특성에서 1700 LST에 전체적인 시스템은 이미 대류 단계를 지나 층운 단계에 있음을 알 수 있다. 강수 입자에 의하여 구름의 높이를 대략적으로 추정할 수 있는데, 대류가 발달한 지역에서는 12 km에 이르며, 예코의 선단과 후방에서는 8 - 9 km 정도였다.

연직 방향의 도플러 속도 관측자료에 의하면 외국에서의 연구 사례와 같이 층운 지역에서 최대 입자 낙하속도는 밝은 띠가 나타나는 높은 고도의 바로 하층에서 나타난다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업으로 수행된 것입니다.

참고 문헌

- 최순희 (1996). 이중 도플러 레이더 방법에 의한 열대 중규모 구름무리의 강수 및 바람장 분석. 석사학위논문, 경북대학교.
- Atlas, D., Ulbrich, C. W., Williams, C., and Marks, F. D. (1997). "On the Variability of Tropical Rain Microphysics and Radar Rain Retrievals." *28th Conf. on Radar Meteor.*, pp. 334-337.
- Cressman, G. P. (1959). "An operational objective analysis system." *Mon. Weather Rev.*, 87, pp. 367-374.
- Goke, S and Waldvogel, A. (1997). "Aggregation and Breakup of Hydrometeors in the Melting layer." *28th Conf. on Radar Meteor.*, pp. 386-387.
- Semple, A. T. (1998). "Conceptual Models of Cyclogenesis: A review and unification of conceptual models used to describe the structure and evolution of mid-latitude cyclones." *Joint Centre for Mesoscale Meteorology*, Internal Report 92.
- Young, M. V. (1993). "Cyclogenesis: interpretation of satellite radar images for the forecaster." *Forecasting Research Division tech Report 73* (Bracknell, UK, Meteorological Office), unpublished.

(논문번호:99-091/접수:1999.11.22/심사완료:2000.01.15)